

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.004

东昆仑祁漫塔格小圆山地区辉长辉绿岩年龄、地球化学特征及对区域构造演化的约束

王盘喜^{1,2,3}, 郭峰^{1,2,3}, 王振宁^{1,2}, 冯乃琦^{1,3}WANG Panxi^{1,2,3}, GUO Feng^{1,2,3}, WANG Zhenning^{1,2}, FENG Naiqi^{1,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;

2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;

3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, He'nan, China;

2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, He'nan, China;

3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:通过东昆仑祁漫塔格小圆山辉长辉绿岩岩相学、年代学和岩石地球化学研究,探讨其岩浆作用及其源区、成岩构造环境、年龄及地质意义。结果表明,辉长辉绿岩为拉斑玄武岩系列岩石, SiO_2 含量为 48.27%~50.06%, 全碱 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量低, 为 3.10%~4.04%, 且钠较钾富, MgO 含量为 7.81%~8.60%, TFe_2O_3 含量为 10.69%~12.00%, TiO_2 含量为 1.32%~1.76%; ΣREE 平均为 58.13×10^{-6} , δEu 值为 1.02~1.24, 平均为 1.12, 呈轻微正异常; 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上呈 Gd 略亏损的近平坦曲线, 具有轻、重稀土元素分异不明显的轻稀土元素弱富集特征; 岩石明显富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、K、Sr, 活泼的不相容元素 U 和 Th, 轻稀土元素及 Pb, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta 和 P。采用 SIMS 锆石 U-Pb 定年方法, 获得小圆山辉长辉绿岩的年龄加权平均值为 $415\pm 16\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=5.0$) 和 $243\pm 11\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=4.1$), 前者代表辉长辉绿岩的结晶年龄, 后者应代表晚期深部岩浆上升侵位到辉长辉绿岩中形成的锆石结晶年龄, 是对中三叠世末期伸展活动的响应。结合岩石地球化学、构造特征和区域地质背景, 认为小圆山辉长辉绿岩是拉张型岛弧背景下亏损的岩石圈地幔平衡部分熔融的产物, 受到一定程度地壳物质的混染。

关键词: 辉长辉绿岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 区域构造演化; 祁漫塔格; 地质调查工程

中图分类号: P534.4; P588.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)07-1169-15

Wang P X, Guo F, Wang Z N, Feng N Q. Zircon U-Pb ages, geochemical features and constraints on regional tectonic evolution of gabbro-diorite in Xiaoyuanshan area, Qimantage of East Kunlun Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1169-1183

Abstract: This paper discusses magmatism, source area, diagenetic tectonic environment, age and geological significance of Xiaoyuanshan gabbro-diorite (XGD) in Qimantage, East Kunlun, China, through the study of petrography, chronology and rock geochemistry. The test data indicated that the content ranges of SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, MgO , TFe_2O_3 , and TiO_2 were 48.27%~50.06%, 3.10%~4.04% ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), 7.81%~8.60%, 10.69%~12.00%, and 1.32%~1.76% respectively, supporting that XGD should belong to tholeiitic series rocks. The average value of ΣREE , in addition, was 58.13×10^{-6} , and the δEu value was 1.02~1.24 with its average of 1.12, showing slightly negative Eu anomaly. The normalized distribution pattern of REE chondrites presented a nearly flat curve with a slight

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2020-06-14

资助项目: 中国地质调查局项目《长江中游黄石-萍乡-德兴矿山集中区综合地质调查》(编号: DD20190269) 和《青海祁漫塔格金属矿集区综合地质调查》(编号: DD20160073)

作者简介: 王盘喜(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产及综合地质调查研究。E-mail: 4814053@qq.com

loss of Gd, and had weak enrichment characteristics of LREE with no obvious differentiation between LREE and HREE. The rock was obviously enriched in large ion lithophile elements (Cs, Rb, Ba, K and Sr), active incompatible elements (U and Th), relatively depleted in high field strength elements (Nb, Ta and P), LREE, and Pb. The crystallization age of XGD and the zircon crystallization age formed by the late deep magma rising and emplacement into XGD were respectively obtained to be 415 ± 16 Ma (MSWD=5.0) and 243 ± 11 Ma (MSWD=4.1) by SIMS zircon U-Pb method. And the latter indicated a response to the extension activity at the end of the Middle Triassic. Conclusively, it was considered that XGD was a product from partial melting of the depleted lithospheric mantle balance in the extensional island arc background, and was contaminated by crustal materials to a certain extent.

Key words: gabbro - diabase; zircon U - Pb ages; geochemical features; regional tectonic evolution; Qimantage; geological survey engineering

东昆仑位于青藏高原北部、柴达木盆地西南缘,构造-岩浆作用强烈,是青藏高原内部可与冈底斯带相媲美的一条巨型构造岩浆岩带^[1-6],对探讨东昆仑乃至青藏高原形成演化具有十分重要的意义^[7]。祁漫塔格地区位于东昆仑造山带的西段,前人对该区的中酸性岩体做了大量年代学和地球化学研究,而对基性岩的关注较少,制约了对区内岩浆活动规律的系统认识^[7-11]。辉绿岩作为陆块伸展背景下幔源岩浆侵位于地壳的产物,其发育标志着刚性、半刚性古陆块的存在,并且可作为衡量构造转换时间的标尺^[11]。多数学者认为,东昆仑地区大量分布的基性岩墙群属印支晚期发育的一期幔源岩浆活动,侵位可能与柴达木盆地的形成过程有关^[12]。部分学者认为,还存在一期更早的基性岩墙群,作为华力西期-印支期构造岩浆旋回开始的标志^[11]。因此,区内至少存在 2 期辉绿岩墙。夏日哈木岩浆熔离型超大型铜镍矿床的发现,暗示区内具有形成与基性-超基性岩体有关的岩浆矿床的巨大潜力,应重视对东昆仑地区不同时期幔源岩浆活动的研究。本次选择侵位于奥陶系祁漫塔格群碎屑岩组中的辉长辉绿岩作为研究对象,开展岩相学、年代学和岩石地球化学研究,探讨其形成时代、岩浆作用、源区性质、成岩构造背景等,为东昆仑区域构造演化和成矿地质背景提供基础资料。

1 地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北部,南邻巴颜喀拉造山带,北邻柴达木盆地,其西端被阿尔金大型走滑断裂所截。以由北向南发育的昆北、昆中、昆南和阿尼玛卿南缘 4 条区域性大断裂为界,将东昆仑划分为昆北弧后裂陷带、昆中基底隆起花岗岩带、昆南复合拼贴带、阿尼玛卿蛇绿混杂岩带和北

巴颜喀拉造山带^①(图 1-a)。祁漫塔格地区位于东昆仑造山带西部,是东昆仑造山带的重要组成部分。区内出露地层主要有古元古界金水口岩群白沙河岩组中深变质岩系,中元古界长城系小庙岩组变质岩、蓟县系狼牙山组碳酸盐岩;奥陶系祁漫塔格群碎屑岩-火山岩-碳酸盐岩建造,上泥盆统牦牛山组海陆交互相粗碎屑岩-中酸性火山岩-细碎屑岩建造,显示向上变细变薄的伸展背景磨拉石沉积特征;石炭系大干沟组生物碎屑灰岩、复成分砾岩夹硅质岩建造,二叠系苏组近源滨浅海相碎屑岩-碳酸盐岩建造;上三叠统鄂拉山组陆相火山碎屑岩夹火山熔岩及不稳定碎屑岩建造;第四系以冲、洪积等松散堆积为主^[13]。区内构造活动强烈,主构造线为北西向或近东西向,褶皱以轴向北西西向的复式背斜和向斜构造为主,断裂以北西西向、北西向和近东西向为主体。区内岩浆活动强烈,岩石类型基性-超基性岩、中酸性岩均有出露,蛇绿岩在多处出露,以中酸性岩石分布最广泛,时代包括加里东期、华力西期、印支期和燕山期,以华力西期和印支期为主。岩体多呈岩株、岩基状,在空间上呈不规则状、透镜状、长条状沿北西-南东向区域性断裂分布,构成醒目的北西向侵入岩浆构造带。辉绿岩类的基性岩墙和中酸性岩脉在各期地层及花岗岩中均有分布^[14]。

小圆山地区位于祁漫塔格地区东段(图 1),大地构造位置属于昆北弧后裂陷带。出露地层主要有古元古界金水口岩群片麻岩岩组(Pt_1J^{sp})和片岩岩组(Pt_1J^{sch}),奥陶系祁漫塔格群碎屑岩组(OQ_1)、火山岩组(OQ_2)和碳酸盐岩组(OQ_3),上泥盆统牦牛山组碎屑岩段(D_3m^1),第四系上更新统冲洪积物(Qp_3^{pal})、全新统风积物(Qh^{col})和冲积物(Qh^{al})(图 1-b)。本次研究的辉长辉绿岩侵位于祁漫塔格群碎屑岩组中,祁漫塔格群多呈构造岩块近东西向

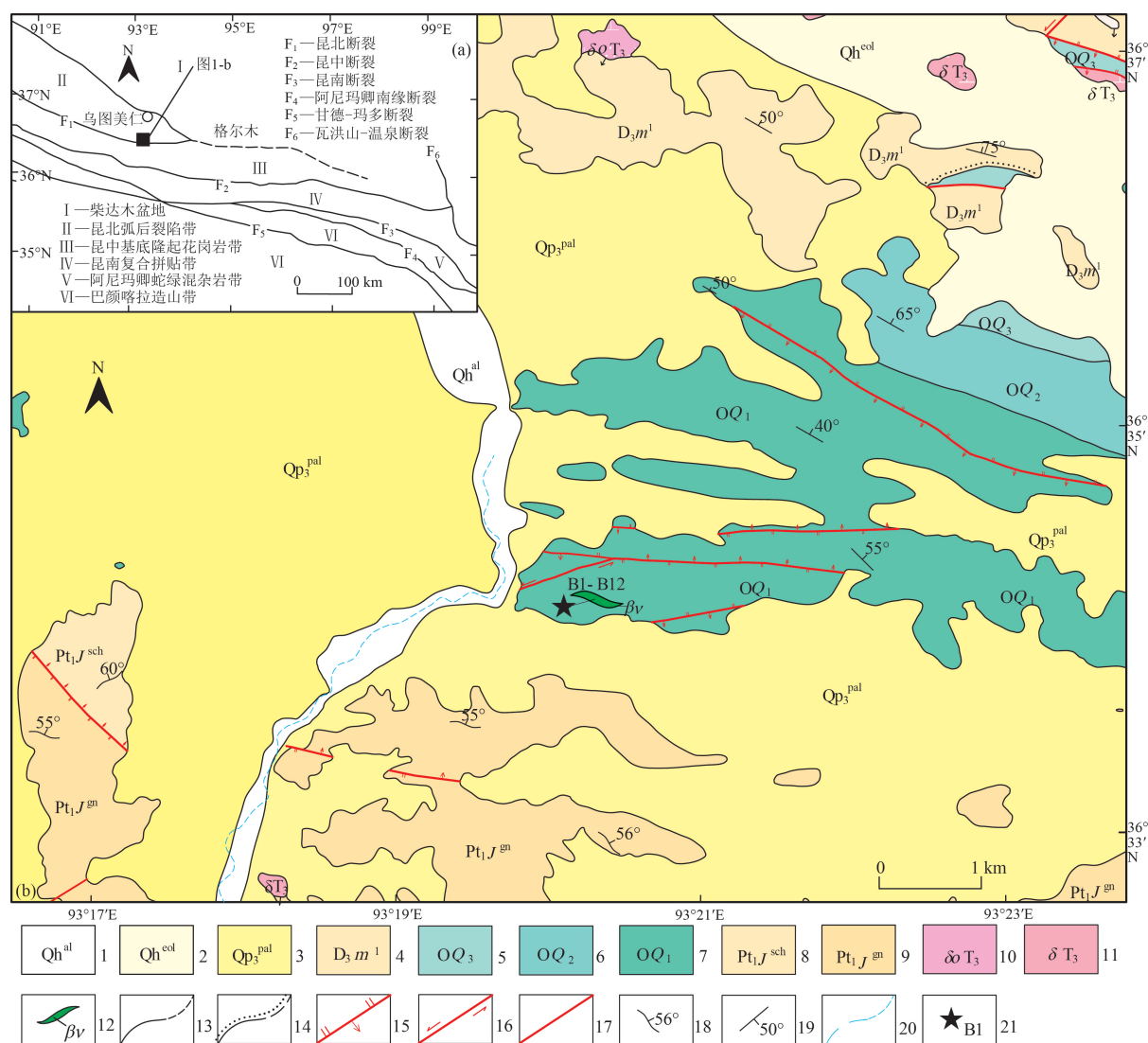


图 1 区域大地构造位置图(a)和小圆山地区地质简图(b)

Fig. 1 Regional geotectonic map (a) and geological sketch map of the Xiaoyuanshan area

1—第四系全新统冲积物; 2—第四系全新统风积物; 3—第四系上更新统冲洪积物; 4—上泥盆统牦牛山组碎屑岩段; 5—奥陶系祁漫塔格群碳酸盐岩组; 6—奥陶系祁漫塔格群火山岩组; 7—奥陶系祁漫塔格群碎屑岩组; 8—元古界金水口岩群片岩岩组; 9—元古界金水口岩群片麻岩岩组; 10—晚三叠世石英闪长岩; 11—晚三叠世闪长岩; 12—辉长辉绿岩岩墙; 13—实测及推测地质界线; 14—实测及推测不整合界线; 15—实测及推测逆断层; 16—走滑断层; 17—性质不明断层; 18—片麻理产状; 19—层理产状; 20—水系; 21—样品位置及编号

展布。研究区岩浆岩零星分布, 呈小岩株状, 平面形态呈似椭圆状、带状、不规则带状, 主要为晚三叠世石英闪长岩(δT_3)、闪长岩(δT_3)等中酸性岩体, 侵入不同时代的地层中。岩脉类型有辉绿岩、辉绿玢岩、辉长辉绿岩、闪长(玢)岩脉、石英闪长岩脉、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗岩、花岗斑岩、钾长花岗岩、钾长花岗斑岩、花岗细晶岩、石英脉等。研究区北西西向断裂最发育, 走向上延伸规模较大, 以断面北倾、倾角较陡、断层面弯曲的逆断

层为主, 切割了研究区所有地层体, 并被北北西向、北东向的断裂所截切。

2 辉长辉绿岩地质及岩相学特征

本次发现了侵位于奥陶系祁漫塔格群碎屑岩组中的辉长辉绿岩岩墙(图 2, 图版 I-a, b)。研究区祁漫塔格群碎屑岩组主要为一套砂岩为主夹杂砂岩、板岩、粉砂岩的岩石组合; 火山岩组主要为一套灰绿色强蚀变玄武安山岩、灰色块层状强碳酸盐

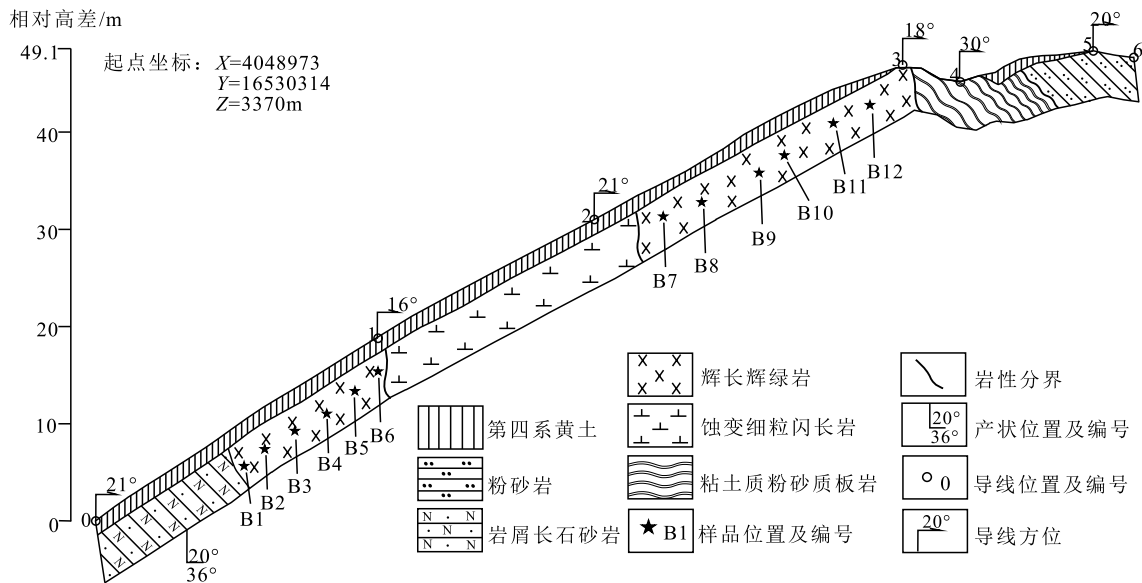


图2 小圆山地区辉长辉绿岩及其围岩探槽剖面图

Fig. 2 Channel profile of the gabbro-diabase and surrounding rock in Xiaoyuanshan area

化玄武岩、灰绿色块层状玻基玄武岩及玄武岩组合。玄武岩发育枕状构造;碳酸盐岩变质、变形、变位较强烈,岩石类型复杂,主要为一套灰色-灰白色块层状粉晶灰岩、微晶灰岩及泥晶灰岩夹大理岩的岩石组合。辉长辉绿岩围岩主要为岩屑长石砂岩(图版 I -c)夹薄层粉砂岩,岩石层理发育,较破碎,岩层产状为 $13^{\circ} \angle 45^{\circ}$ 。另可见晚期细粒蚀变闪长岩脉侵入辉长辉绿岩中,砂岩受到后期岩墙的烘烤作用,发生热接触变质作用形成粘土质粉砂质板岩。辉长辉绿岩岩墙呈灰绿色,致密块状,被闪长岩脉分割后宽度分别为 19.2 m 和 32.5 m,两者呈近平行展布,走向约 115° ,倾向约 25° ,倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,向两侧延伸较远。岩石坚硬,断面可见黄铁矿化、黄铜矿化。闪长岩脉宽约 29 m,呈北西—南东向展布,与辉长辉绿岩呈侵入接触关系,倾向北东。

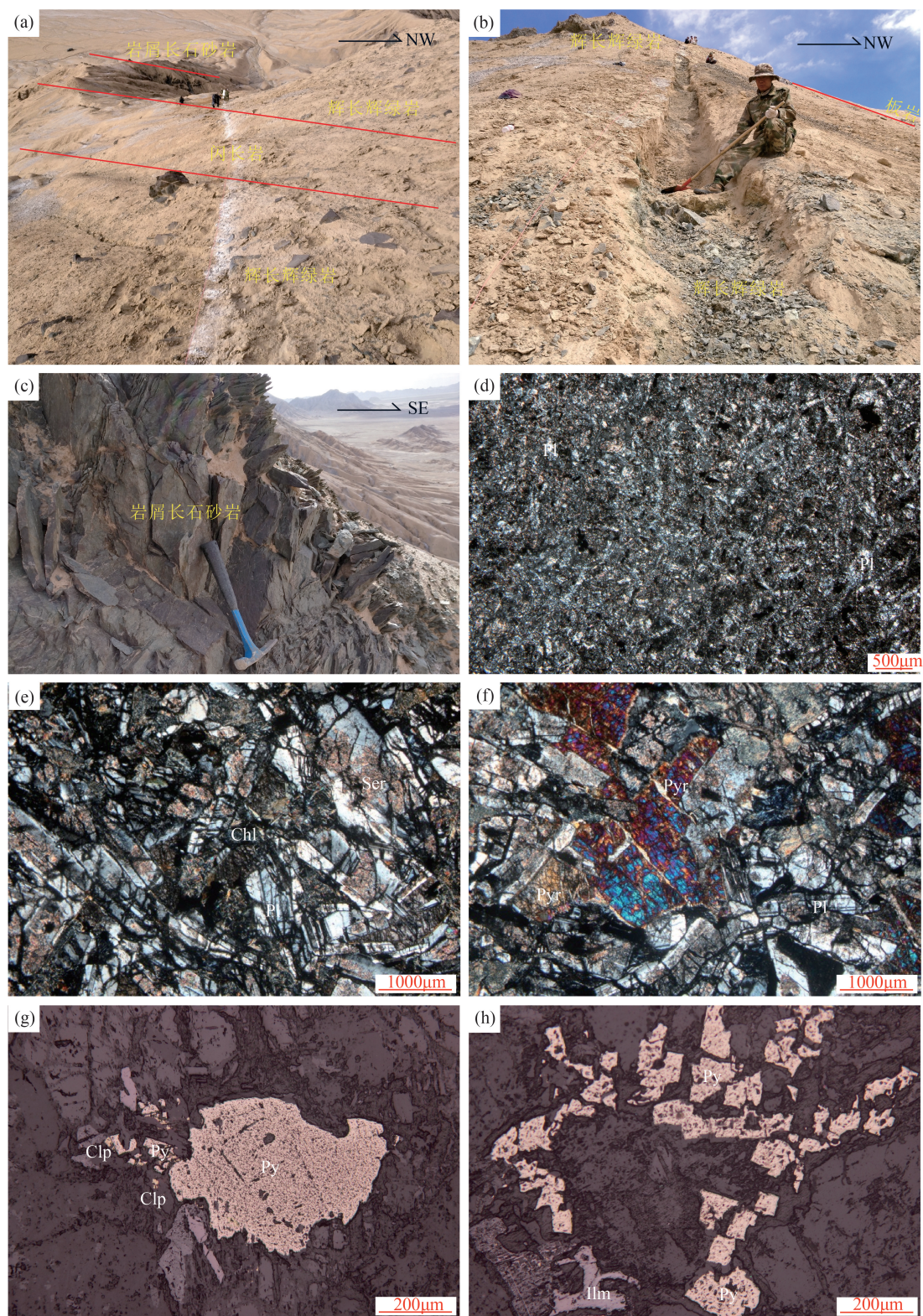
辉长辉绿岩发生了蚀变,新鲜面为灰绿色,辉长、辉绿结构,嵌晶含长结构,块状构造。岩石主要由斜长石(拉长石)、暗色矿物组成,斜长石含量 $60\% \sim 70\%$,呈半自形板状,粒径为 $0.25 \sim 2.5$ mm,部分 $2.5 \sim 3.5$ mm,杂乱或搭成格架状分布,可见聚片双晶,具粘土化、绢云母化、绿泥石化、褐铁矿化(图版 I -e);暗色矿物含量 $30\% \sim 40\%$,主要为单斜辉石,呈半自形柱状,粒径为 $0.2 \sim 2.2$ mm,部分 $2.2 \sim$

3.5 mm,填隙状分布于斜长石格架间,构成辉绿结构,或杂乱分布,单偏光下呈淡粉色,为含钛辉石,少量粒内嵌布斜长石,构成嵌晶含长结构(图版 I -f),单斜辉石发生了绿泥石化、次闪石化和褐铁矿化,表面发育裂纹,部分暗色矿物呈绿泥石化、轻次闪石化、褐铁矿化假象产出。岩石内可见少量被硅质、碳酸盐充填的裂隙;副矿物为黄铁矿(图版 I -g,h)、钛铁矿(图版 I -h)、黄铜矿(图版 I -g)、磷灰石;次生矿物为粘土、绢云母、硅质、碳酸盐、次闪石、绿泥石、褐铁矿。

岩屑长石砂岩由石英、长石、粘土岩岩屑、白云母等陆源砂屑和粘土质杂基填隙物组成,粒径呈细—粗粒不等的杂乱分布,石英约 60% ,长石约 25% ,岩屑 $5\% \sim 10\%$,白云母约 2% ,粘土质杂基约 5% ,长石发生了高岭土化、绢云母化、轻褐铁矿化,岩屑和白云母具褐铁矿化。

闪长岩呈细粒半自形粒状结构,块状构造;主要由斜长石和暗色矿物组成,斜长石约 85% ,呈半自形板条状,粒径为 $0.1 \sim 0.6$ mm,杂乱分布,后期具较强粘土化、绢云母化、褐铁矿化;暗色矿物含量为 15% ,多呈绿泥石化、褐铁矿化假象产出,杂乱分布于斜长石间,粒径为 $0.05 \sim 0.5$ mm,部分晶体略显半自形柱状晶形,推测为角闪石或辉石假象(图版 I -d)。

图版 I Plate I



a. 辉长辉绿岩及其围岩; b. 辉长辉绿岩, 粘土质粉砂质板岩; c. 岩屑长石砂岩; d. 细粒蚀变闪长岩; e. 辉长辉绿岩, 斜长石粘土化、绢云母化、绿泥石化和褐铁矿化; f. 辉长辉绿岩, 辉长结构、辉绿结构、嵌晶含长结构; g. 黄铁矿、黄铜矿; h. 黄铁矿、钛铁矿; Pyr—辉石; Pl—斜长石; Chl—绿泥石; Ser—绢云母; Clp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Ilm—钛铁矿

粘土质粉砂质板岩呈泥质粉砂状结构,板状构造;主要由约 55% 的陆源粉砂和约 45% 的粘土质组成。陆源粉砂为石英、长石和少量白云母,粘土质由隐晶-微鳞片状粘土矿物组成,长轴定向排列,部分受变质作用转变为绢云母,后期具褐铁矿化。

3 样品采集及测试方法

本次年代学及地球化学分析样品均采自小圆山地区辉长辉绿岩岩墙(图 1、图 2),为新鲜岩石。对 $B_1 \sim B_{12}$ 样品进行了薄片鉴定和全岩化学分析,对 B_2 样品进行了锆石 U-Pb 测年。薄片鉴定由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,全岩化学分析及锆石 U-Pb 年龄分析测试在核工业北京地质研究院实验室完成。

主量元素采用电子天平、AL104、AB104L 和 AxiosmAX X 射线荧光光谱仪分析测试,分析精度优于 1%;微量元素采用 ELEMENT XR 等离子体质谱仪分析测试,分析精度优于 5%~10%。

锆石 U-Pb 测年制靶采用破碎后岩石样品,通过重液和磁选分选出锆石晶体,将双目镜下人工挑纯后的锆石固定在环氧树脂上,抛光打磨至露出核心,完成制靶过程。利用透射光、反射光、阴极发光图像确定分析点位置。锆石 U、Th 和 Pb 同位素分析在 CEMECA IMS 1280-HR 二次离子质谱仪(SIMS)上进行。以 Plesovice 锆石为标样,实验流程和数据处理详见 Li 等^[15]。数据结果处理采用

Isoplot 处理。

4 岩石地球化学特征

小圆山辉长辉绿岩全岩地球化学分析结果见表 1。由分析结果可知,岩石的烧失量较高,为 3.28%~7.42%,平均为 5.09%,说明岩石蚀变较强。结合岩矿鉴定结果,推测岩石发生了粘土化、绢云母化、绿泥石化、褐铁矿化等蚀变,TAS 图解已不适用于该岩石投点,因此采用 $SiO_2-Zr/TiO_2 \times 0.0001$ (图 3-a) 和 $Ta/Yb-Th/Yb$ (图 3-b) 图解进行判别,在图 3-a 中,样品点全部落入亚碱性玄武岩区域,在图 3-b 中,样品点全部落入拉斑玄武岩系列区域。因此,小圆山辉长辉绿岩应属于拉斑玄武岩系列。

4.1 主量元素

小圆山辉长辉绿岩的烧失量较高,主量元素换算为干体系后, SiO_2 含量为 48.27%~50.06%,平均为 49.03%,与基性岩相当; Al_2O_3 含量为 16.97%~17.91%,平均为 17.54%,均值略高于岛弧拉斑玄武岩(16%)^[18] 和大陆溢流玄武岩(17.08%)^[19],明显不同于太平洋、大西洋和印度洋洋中脊拉斑玄武岩(14.86%,15.6%和 15.15%)^[20]; K_2O 含量为 0.70%~1.26%,平均为 0.99%, Na_2O 含量为 2.28%~2.78%,平均为 2.60%,钠较钾富,全碱 Na_2O+K_2O 含量低,为 3.10%~4.04%,平均为 3.59%; CaO 含量为 6.40%~9.42%,平均为 8.35%;

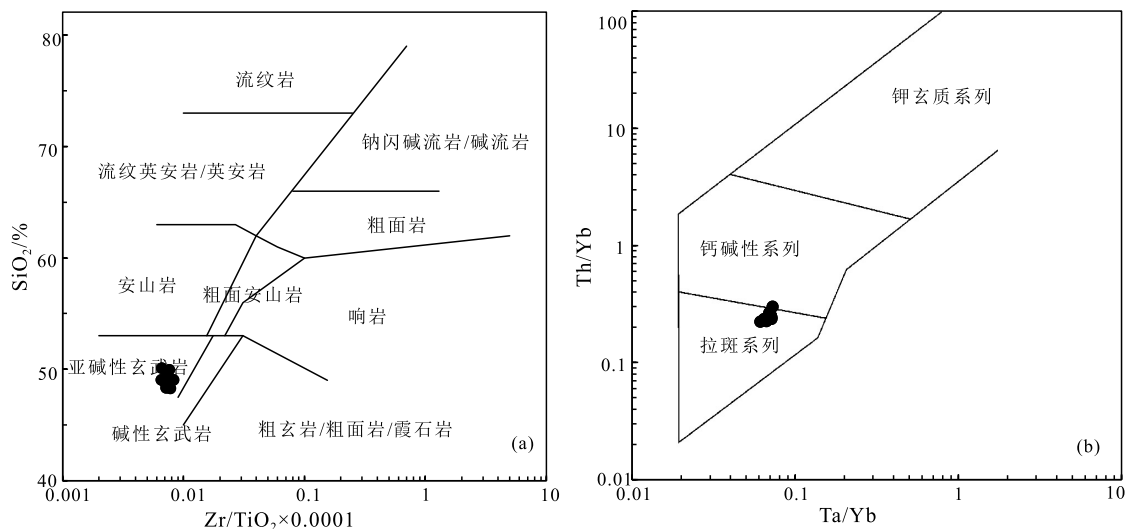


图 3 小圆山辉长辉绿岩 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ (a, 底图据参考文献[16]) 和 $Ta/Yb-Th/Yb$ (b, 据参考文献[17]) 图解

Fig. 3 SiO_2 vs. $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ (a) and Ta/Yb vs. Th/Yb (b) diagrams of gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area

表 1 小圆山辉长辉绿岩主量、微量和稀土元素数据

Table 1 Data of major, trace elements and REE of the gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area												
样号	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
SiO ₂	46.32	47.64	46.56	47.99	46.06	45.83	45.54	46.62	45.82	47.15	46.50	45.93
Al ₂ O ₃	16.03	17.13	16.79	17.20	16.38	15.92	16.16	17.09	16.67	16.81	17.14	16.39
TFe ₂ O ₃	11.10	10.93	10.74	11.39	10.91	10.86	10.86	10.79	10.33	10.28	10.85	10.94
FeO	8.98	9.36	8.54	8.70	8.98	8.67	9.05	8.71	8.46	8.43	9.30	9.44
MgO	7.23	7.99	7.68	7.98	7.84	7.53	7.59	8.00	7.28	8.07	8.28	7.42
CaO	6.52	7.56	7.57	6.15	8.51	8.11	8.53	8.76	8.41	9.06	8.41	7.50
Na ₂ O	2.48	2.53	2.64	2.45	2.36	2.56	2.14	2.49	2.19	2.57	2.63	2.54
K ₂ O	0.888	0.987	1.20	1.04	0.813	1.11	1.04	1.01	0.696	0.674	0.758	1.03
MnO	0.164	0.173	0.166	0.169	0.170	0.173	0.170	0.176	0.150	0.160	0.167	0.170
TiO ₂	1.63	1.55	1.53	1.57	1.48	1.55	1.49	1.47	1.40	1.27	1.45	1.49
P ₂ O ₅	0.166	0.150	0.155	0.159	0.148	0.158	0.151	0.154	0.147	0.130	0.146	0.144
烧失量	7.42	3.30	4.93	3.84	5.29	6.17	6.26	3.28	6.85	3.76	3.57	6.41
总量	99.95	99.94	99.96	99.94	99.96	99.97	99.93	99.84	99.94	99.93	99.90	99.96
Mg [#]	58.24	59.98	59.85	59.09	60.06	59.42	59.65	60.34	60.00	61.79	61.08	58.95
La	5.78	5.78	5.58	5.66	5.61	5.67	5.65	5.84	5.33	4.33	5.33	5.51
Ce	14.8	15.3	14.7	14.7	14.4	14.7	14.9	15.3	14.3	11.2	14.1	14.5
Pr	2.50	2.51	2.38	2.49	2.39	2.46	2.49	2.48	2.40	1.93	2.36	2.45
Nd	13.4	13.0	13.1	13.2	12.6	13.1	13.0	13.5	13.0	10.3	12.8	13.2
Sm	4.22	4.13	3.84	4.12	4.00	3.83	3.93	4.03	3.78	3.16	3.85	3.80
Eu	1.34	1.36	1.33	1.38	1.42	1.37	1.46	1.37	1.43	1.25	1.39	1.39
Gd	3.66	3.64	3.62	3.71	3.69	3.56	3.54	3.49	3.47	2.88	3.36	3.60
Tb	0.855	0.835	0.807	0.863	0.812	0.845	0.829	0.830	0.827	0.687	0.832	0.816
Dy	5.19	5.20	5.20	5.25	5.33	5.24	5.24	5.13	4.81	4.26	4.93	5.03
Ho	1.17	1.19	1.16	1.19	1.17	1.20	1.16	1.15	1.12	0.97	1.14	1.14
Er	3.06	3.06	2.93	2.98	2.96	3.05	3.04	2.98	2.81	2.37	3.02	2.95
Tm	0.515	0.492	0.519	0.525	0.508	0.515	0.519	0.510	0.498	0.422	0.489	0.510
Yb	3.30	3.30	3.30	3.35	3.32	3.35	3.30	3.22	3.15	2.65	3.39	3.26
Lu	0.461	0.492	0.469	0.466	0.469	0.454	0.492	0.475	0.463	0.384	0.474	0.465
Y	32.7	31.3	31.3	31.7	30.7	31.3	31.4	30.9	30.5	25.1	30.2	29.6
Cs	5.92	2.43	2.49	2.85	5.35	4.54	5.01	2.48	3.96	1.92	1.90	1.85
Rb	39.4	37.2	48.0	47.1	39.7	47.2	52.2	49.7	40.9	33.7	41.0	60.3
Ba	199	282	516	446	268	230	313	635	213	362	434	290
Th	0.867	0.981	0.827	0.831	0.774	0.764	0.776	0.749	0.726	0.584	0.758	0.784
U	0.300	0.295	0.254	0.236	0.237	0.254	0.256	0.226	0.241	0.183	0.243	0.285
Nb	2.95	2.89	2.89	2.70	2.60	2.61	2.86	2.71	2.61	2.02	2.51	2.70
Ta	0.230	0.240	0.234	0.239	0.215	0.213	0.232	0.230	0.217	0.162	0.227	0.233
Zr	109	114	127	121	107	109	112	106	104	83.4	114	116
Hf	2.82	2.94	2.92	2.92	2.79	3.02	3.03	2.54	2.75	2.26	2.77	2.92
Pb	1.80	2.05	1.94	1.62	3.44	1.95	1.86	2.00	3.21	1.77	1.88	2.26
Sr	208	233	225	216	288	220	238	250	218	206	233	216
V	233	236	218	235	226	228	228	212	221	219	211	220
Cr	173	232	179	197	181	165	175	172	169	221	184	154
Ni	55.6	74.1	70.3	66.5	74.9	71.6	71.1	74.9	81.3	69.7	75.3	68.1
ΣREE	60.25	60.29	58.94	59.88	58.68	59.34	59.55	60.31	57.39	46.79	57.47	58.62
ΣLREE	42.04	42.08	40.93	41.55	40.42	41.13	41.43	42.52	40.24	32.17	39.83	40.85
ΣHREE	18.21	18.21	18.01	18.33	18.26	18.21	18.12	17.79	17.15	14.62	17.64	17.77
ΣLREE/ΣHREE	2.31	2.31	2.27	2.27	2.21	2.26	2.29	2.39	2.35	2.20	2.26	2.30
La _N /Yb _N	1.26	1.26	1.21	1.21	1.21	1.21	1.23	1.30	1.21	1.17	1.13	1.21
δEu	1.02	1.05	1.07	1.06	1.11	1.12	1.17	1.09	1.19	1.24	1.15	1.13
δCe	0.95	0.98	0.99	0.96	0.96	0.96	0.97	0.99	0.98	0.95	0.97	0.97

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

MgO 含量为 7.81%~8.60%, 平均为 8.16%; TFe_2O_3 含量为 10.69%~12.00%, 平均为 11.42%; TiO_2 含量为 1.32%~1.76%, 平均为 1.57%。

4.2 稀土元素

小圆山辉长辉绿岩的稀土元素总量 (ΣREE) 低, 为 $46.79 \times 10^{-6} \sim 60.31 \times 10^{-6}$, 平均为 58.13×10^{-6} , 其中 ΣLREE 为 $32.17 \times 10^{-6} \sim 42.52 \times 10^{-6}$, 平均为 40.43×10^{-6} , ΣHREE 为 $14.62 \times 10^{-6} \sim 18.33 \times 10^{-6}$, 平均为 17.69×10^{-6} , 具有轻稀土元素弱富集特征。 $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 值为 2.20~2.39, 平均为 2.28, $\text{La}_N / \text{Yb}_N$ 值为 1.13~1.30, 平均为 1.22, 显示轻、重稀土元素分异不明显。 δEu 值为 1.02~1.24, 平均为 1.12, 呈轻微正异常。 δCe 值为 0.95~0.99, 平均为 0.97, Ce 呈轻微负异常, 可能反映了岩浆演化过程中氧化还原条件较稳定。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (图 4-a) 呈 Gd 略为亏损的近平坦曲线。

4.3 微量元素

小圆山辉长辉绿岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 4-b) 显示, 岩石明显富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、K、Sr, 活泼的不相容元素 U 和 Th, 轻稀土元素及 Pb; 相对亏损高场强元素 Nb、Ta 和 P; P 的亏损可能反映岩石受到磷灰石分离结晶作用的影响。

5 锆石 U-Pb 年龄

辉长辉绿岩样品中的 15 颗锆石为无色透明, 长柱状, 锆石长轴在 50~145 μm 之间, 长宽比值介于 1.2~4.0 之间, 大部分锆石发育清晰的振荡环带结

构, 表明为岩浆成因 (图 5)。锆石同位素分析测试结果见表 2, 不同成因锆石 Th/U 值不同: 岩浆锆石 Th/U 值较大, 一般大于 0.1; 变质锆石的 Th/U 值小, 一般小于 0.1^[22]。小圆山地区辉长辉绿岩锆石的 Th/U 值为 0.1~1.1, 平均为 0.8, 为典型的岩浆成因锆石。

测试的 15 个锆石 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 的表面年龄数据范围较宽, 介于 232.9~460.1 Ma 之间。这些年龄数据大致可分为 2 组, 第一组 396.0~448.9 Ma; 第二组 232.9~262.3 Ma (图 6-a, b)。对于第一组数据, 有 7 个点落在谐和线上, 年龄加权平均值为 415 ± 16 Ma (MSWD=5.0) (图 6-c, d), 为早泥盆世早期岩浆活动的产物。对于第二组数据, 有 6 个点落在谐和线上, 年龄加权平均值为 243 ± 11 Ma (MSWD=4.1) (图 6-e, f), 为中三叠世岩浆活动的产物。

6 讨论

6.1 岩浆作用及其源区

研究区辉长辉绿岩的 MgO 含量换算为干体系后为 7.81%~8.60%, 平均为 8.16%, Cr 含量为 $154 \times 10^{-6} \sim 232 \times 10^{-6}$, 平均为 183.5×10^{-6} , Ni 含量为 $55.6 \times 10^{-6} \sim 81.3 \times 10^{-6}$, 平均为 71.1×10^{-6} , 含量远低于原生岩浆参考值 (MgO 含量 10%~12%, Cr 含量 250×10^{-6} , Ni 含量 $90 \times 10^{-6} \sim 670 \times 10^{-6}$)^[23]; $\text{Mg}^\#$ 值 (干体系) 为 58.24~61.79, 平均为 59.87, 亦低于原生岩浆参考值 ($\text{Mg}^\#$ 为 68~75)^[24], 说明研究区辉长辉绿岩发生了一定程度的橄榄石、单斜辉石等镁铁质矿物的分离结晶。岩石稀土元素配分曲线呈 Gd 略亏损的近平坦曲线, 轻、重稀土元素分馏不明显, 呈轻

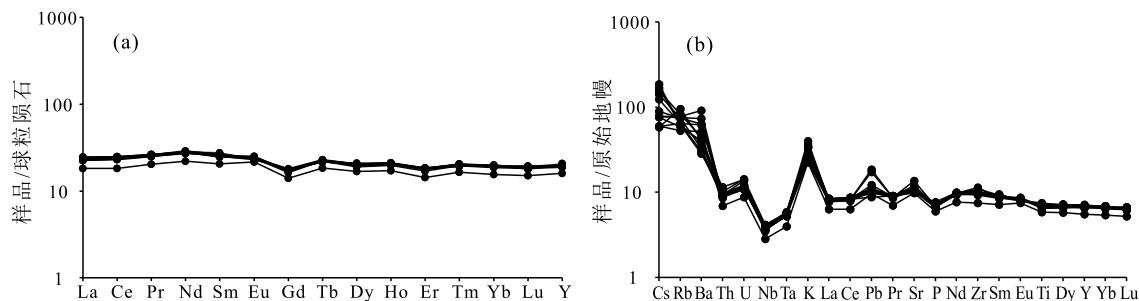


图 4 小圆山辉长辉绿岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图解 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)
(标准化值据参考文献[21])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area

表 2 小圆山辉长辉绿岩锆石 U-Th-Pb 年龄分析结果
Table 2 U-Th-Pb isotopic data of zircons for gabbro-diabase in Xiaoyuanshan

测点	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma								
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		1σ
1	437.0	494.5	0.802	0.0517	2.7	0.296	3.5	0.0415	2.2	262.3	5.8	274.3	61.8	263.5	8.3			
2	1699	1777	0.788	0.0565	1.2	0.543	2.2	0.0697	1.8	434.3	7.6	470.6	26.4	440.1	7.8			
3	3723	2845	1.03	0.0554	1.6	0.493	2.6	0.0645	2.1	402.9	8.1	430.0	35.1	406.9	8.8			
4	1679	2042	1.11	0.0495	2.2	0.270	3.1	0.0396	2.2	250.2	5.5	169.7	50.8	242.6	6.8			
5	603.1	857.0	0.641	0.0508	3.2	0.263	3.8	0.0375	2.1	237.4	4.8	231.4	71.3	236.8	8.0			
6	3715	3765	0.921	0.0507	1.5	0.261	2.3	0.0373	1.8	236.3	4.1	225.2	33.6	235.3	4.8			
7	976.3	2088	0.444	0.0554	1.3	0.551	2.3	0.0721	2.0	448.9	8.6	428.9	27.7	445.6	8.5			
8	110.5	778.1	0.117	0.0553	1.8	0.483	2.9	0.0634	2.2	396.0	8.6	424.6	40.7	400.2	9.6			
9	1459	1077	1.12	0.0570	2.0	0.582	3.7	0.0740	3.1	460.1	13.6	492.9	44.1	465.6	13.8			
10	1182	1662	0.591	0.0513	1.9	0.260	3.0	0.0368	2.3	232.9	5.3	253.8	42.7	234.8	6.3			
11	183.8	330.4	0.568	0.0556	2.0	0.531	3.3	0.0692	2.6	431.2	11.0	438.1	44.0	432.3	11.7			
12	355.6	527.1	0.837	0.0530	1.4	0.463	2.7	0.0634	2.3	396.2	8.9	327.8	32.3	386.4	8.8			
13	4748	4398	1.06	0.0557	0.47	0.518	3.3	0.0674	3.2	420.3	13.1	441.6	10.5	423.6	11.3			
14	1483	2540	0.878	0.0492	0.88	0.263	2.6	0.0388	2.4	245.2	5.8	158.5	20.6	237.2	5.4			
15	482.3	1353	0.398	0.0539	1.1	0.483	2.7	0.0651	2.4	406.3	9.5	364.9	24.6	400.2	8.8			

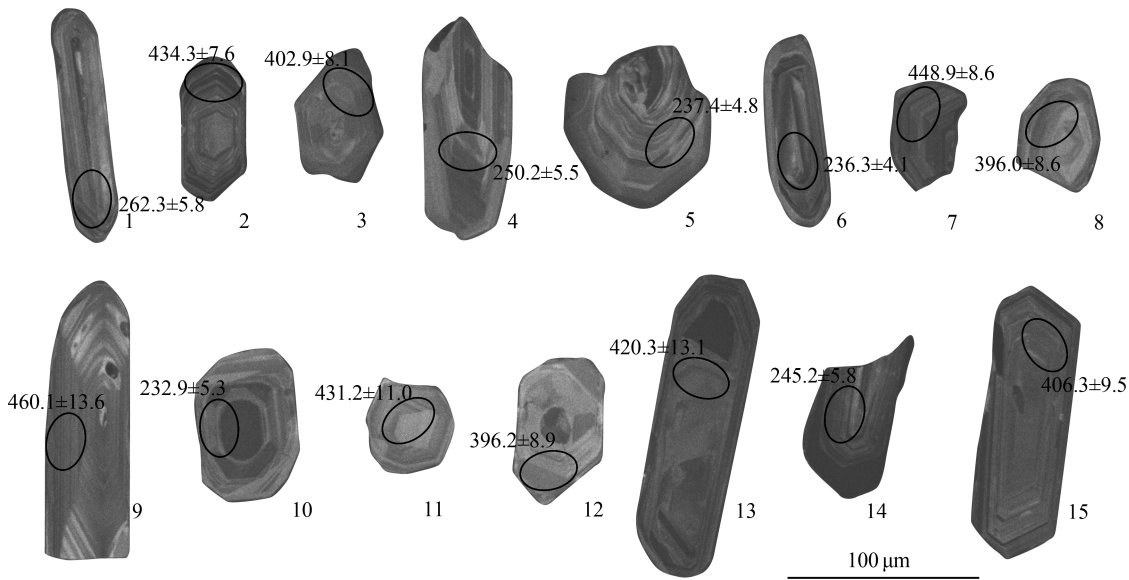


图 5 小圆山辉长辉绿岩锆石阴极发光 (CL) 图像 (年龄单位: Ma)
Fig. 5 CL image of zircons for gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area

微的正 Eu 异常,表明岩浆分离结晶的程度不强,可以认为辉长辉绿岩是岩浆源区平衡部分熔融的产物。
源于软流圈的玄武岩 $\text{La}/\text{Nb}<1.5$ 、 $\text{La}/\text{Ta}<22$,

而源于岩石圈地幔的玄武岩与之相反^[25],研究区辉长辉绿岩的 La/Nb 值为 1.93~2.17, La/Ta 值为 23.48~26.73, 指示其源于岩石圈地幔;玄武岩的 TiO_2 含量的差别可由地幔橄榄岩熔融程度不同而

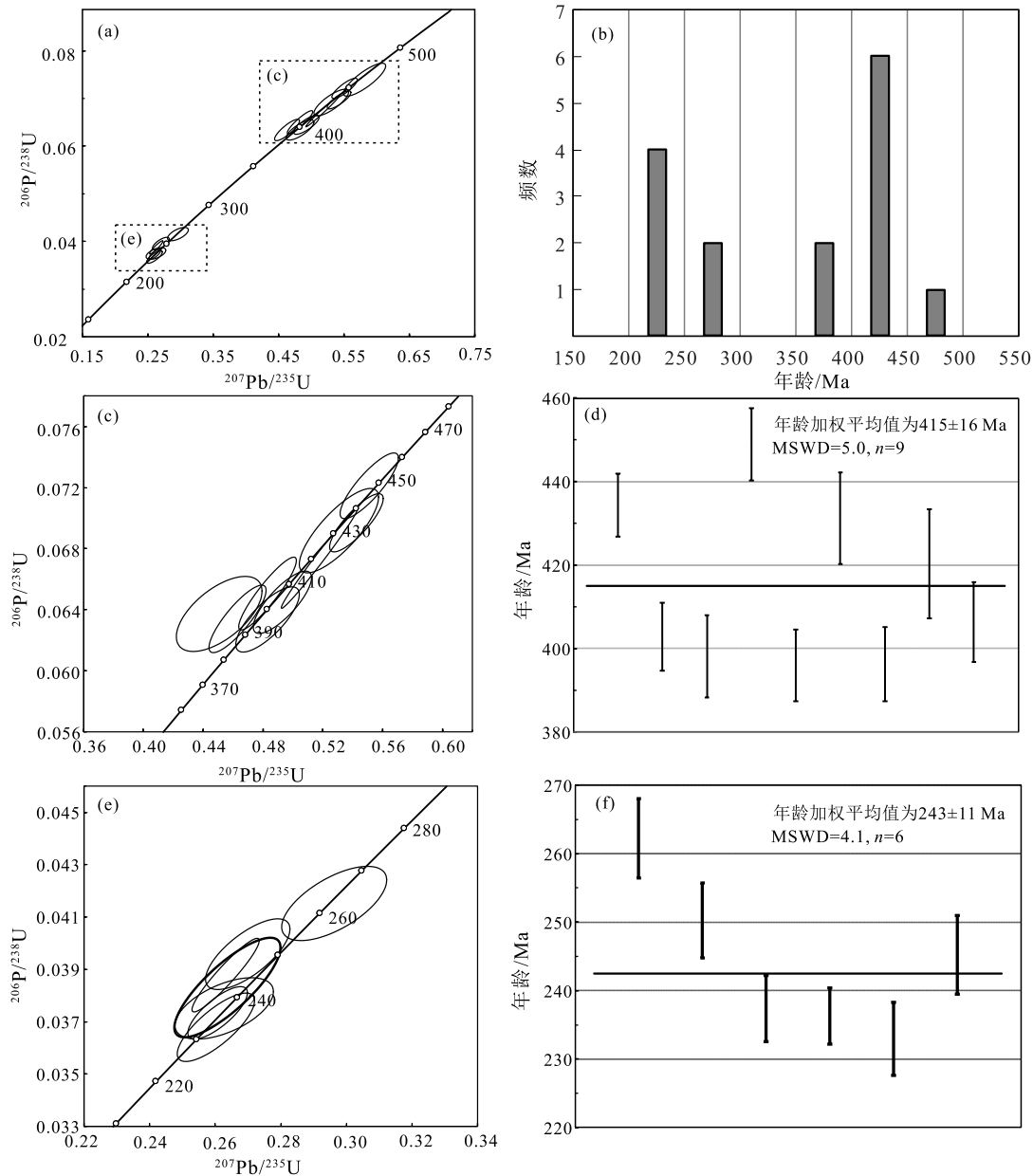


图6 小圆山辉长辉绿岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia plots of zircons for gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area

导致,源于软流圈的玄武质岩浆具有相对高的 TiO_2 含量(OIB 的 TiO_2 含量平均为 2.86%),源于岩石圈地幔的则具有较低的 TiO_2 含量^[26-27]。研究区辉长辉绿岩(干体系)的 TiO_2 含量为 1.32%~1.76%,平均为 1.57%,远低于软流圈玄武质岩浆 TiO_2 的平均值,而辉绿岩中 Ti 元素随着风化程度加深有富集趋势^[28],亦指示辉长辉绿岩源于岩石圈地幔。

Nb、Zr、Y 在地幔-玄武质熔浆间的总分配系数

近于 1,又由于它们的不活动性,不受交代、蚀变或风化作用的影响,可基本代表源区地幔的成分^[29]。在 Zr-Nb 图解(图 7-a)中,小圆山辉长辉绿岩样品点均落在亏损地幔的端元,在 Zr-Y 图解(图 7-b)中,少数样品点落入亏损地幔的端元,大部分落入靠近亏损地幔的过渡型地幔端元,可能与地壳物质的混染有关。因此,小圆山辉长辉绿岩应形成于亏损地幔的源区。

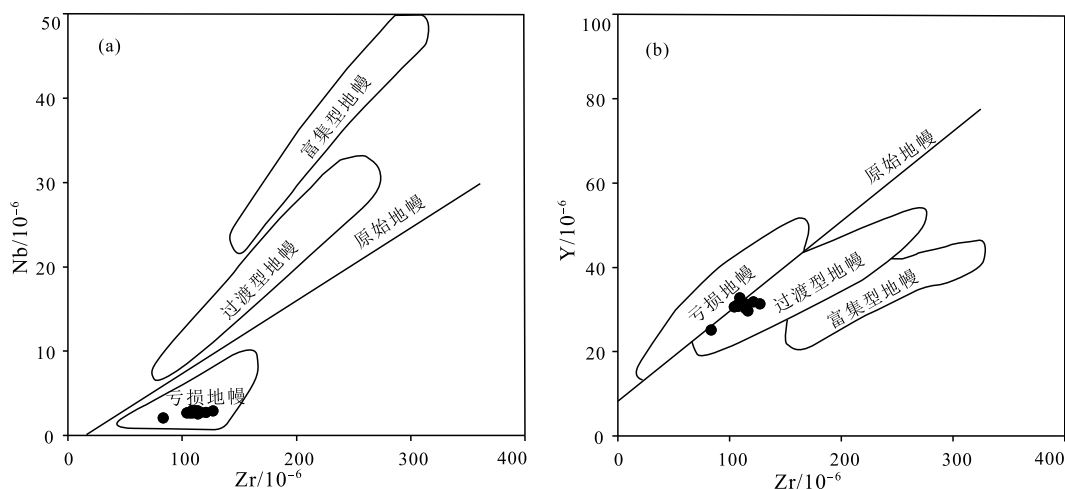


图 7 小圆山辉长辉绿岩 Zr-Nb(a) 和 Zr-Y(b) 图解 (底图据参考文献[30])

Fig. 7 Zr vs.Nb(a) and Zr vs.Y(b) diagrams of the gabbro-diabase in Xiaoyuanshan area

由小圆山辉长辉绿岩的 Zr/Nb 、 La/Nb 、 Ba/Nb 、 Th/Nb 、 Th/La 及 Ba/La 特征比值与壳幔单元的对比值可知(表 3), 岩石显示出壳幔源混合的特征, 说明源区岩浆在成岩过程中受到一定程度地壳物质的混染。 Zr/Nb 、 Ba/Nb 和 Ba/La 值明显高于壳幔单元值(表 3), 夏日哈木大致同期形成的辉长岩特征值亦显著高于各类壳幔单元值, 本文辉长辉绿岩的 Nb 含量为 $2.02 \times 10^{-6} \sim 2.95 \times 10^{-6}$, La 含量为 $4.33 \times 10^{-6} \sim 5.84 \times 10^{-6}$, Zr 含量为 $83.4 \times 10^{-6} \sim 127 \times 10^{-6}$, Ba 含量为 $199 \times 10^{-6} \sim 635 \times 10^{-6}$ (表 1), 夏日哈木辉长岩^[33] 的 Nb 含量为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 1.85 \times 10^{-6}$, La 含量为 $2.10 \times 10^{-6} \sim 7.55 \times 10^{-6}$, Zr 含量为 $9.11 \times 10^{-6} \sim 46.82 \times 10^{-6}$, Ba 含量为 $66.3 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ 。区内该期形成的基性岩普遍具有低的 Nb 和 La 含量、相对高的 Zr 和 Ba 含量, 导致上述元素特征比值高于各类壳幔单元。

综上所述, 小圆山辉长辉绿岩是亏损的岩石圈地幔平衡部分熔融的产物, 岩浆在成岩过程中受到一定程度地壳物质的混染。

6.2 成岩构造环境

岩石蚀变作用会导致活泼元素 K、Rb、Sr、Ca、Ba、P 明显变化, 而高场强元素、稀土元素和 Th 受影响较小, 更适合用来判别源区特征与构造环境^[34]。在 $Hf/3-Th-Nb/16$ 和 $Th/Yb-Ta/Yb$ 构造环境判别图解(图 8)中, 小圆山辉长辉绿岩仅 1 件样品落在岛弧钙碱性玄武岩区域, 其他样品均落在岛弧拉斑玄武岩区域。

岛弧玄武岩以富集大离子亲石元素(LILE) Sr、Rb、Ba 等, 亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Ti 等为特征。在稀土元素配分曲线图上, 表现为轻稀土元素富集, 重稀土元素较富($(HREE)_N > 10$, $Yb \geq 2 \times 10^{-6}$, $Y \geq 25 \times 10^{-6}$)^[37]。小圆山辉长辉绿岩富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、K、Sr, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta 和 P; 稀土元素配分曲线表现为轻稀土元素略富集, $(HREE)_N$ 均大于 10, Yb 含量为 $2.65 \times 10^{-6} \sim 3.39 \times 10^{-6}$, 平均 3.24×10^{-6} , Y 含量为 $25.10 \times 10^{-6} \sim 32.70 \times 10^{-6}$, 平均 30.56×10^{-6} ; 以上特征与岛弧玄武岩特征一致。其中, 富集的大离子亲石元素主要来自俯冲流体; 亏损高场强元素 Nb、Ta, 是因为这些元素保留在俯冲板片的残留矿物, 如金红石、钛铁矿等^[38] 中。小圆山辉长辉绿岩具轻微的负 Ce 异常, 可能与岩浆源区存在消减沉积物组分有关。

典型的岛弧玄武岩还具有以下地球化学特征: $Nb \leq 12 \times 10^{-6}$, $Ta \leq 0.7 \times 10^{-6}$; $Nb/La \leq 1$, $Hf/Ta \geq 5$, $La/Ta > 15$, $Ti/Y < 350$, $Ti/V \leq 30$, $Hf/Th < 8$, $Th/Yb > 0.1$, $Th/Nb > 0.07$, $Zr/Y < 3$, $Ta/Yb \leq 0.1$ ^[39]。小圆山辉长辉绿岩的 Nb 含量为 $2.02 \times 10^{-6} \sim 2.95 \times 10^{-6}$, 平均 2.67×10^{-6} , Ta 含量为 $0.16 \times 10^{-6} \sim 0.24 \times 10^{-6}$, 平均 0.22×10^{-6} , Nb/La 值为 $0.46 \sim 0.52$, 平均 0.48, Hf/Ta 值为 $3.26 \sim 4.09$, 平均 3.53, La/Ta 值 $23.48 \sim 26.73$, 平均 24.80, Ti/Y 值 $295.28 \sim 322.88$, 平均 308.31, Ti/V 值为 $36.14 \sim 45.31$, 平均 42.07, Hf/Th 值为 $3.00 \sim 3.95$, 平均 3.60, Th/Yb 值为 $0.22 \sim 0.30$, 平均

拉张型岛弧背景^[33]。

综上所述,小圆山辉长辉绿岩的成岩构造环境为岛弧环境,形成于伸展背景条件,应属于拉张型岛弧背景。

6.3 年龄及地质意义

小圆山辉绿岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄数据大致可分为 2 组,第一组年龄加权平均值为 415 ± 16 Ma (MSWD=5.0);第二组年龄加权平均值为 243 ± 11 Ma (MSWD=4.1)。区域上,东昆仑祁漫塔格地区发育大量印支期和加里东晚期—华力西早期的岩浆岩,年龄集中于 210~250 Ma 和 380~420 Ma^[44],其形成分别与始特提斯洋和古特提斯洋的构造体制转化有关^[45]。本次获得的辉长辉绿岩的 2 组年龄数据与区域上 2 次大规模的岩浆活动时间对应。 415 ± 16 Ma 的锆石 U-Pb 年龄应代表辉长辉绿岩的结晶年龄,证据如下:①在锆石阴极发光 (CL) 图像 (图 5) 上,第一组锆石均具有清晰规则的韵律环带结构,多数呈自形程度较好的长柱状、柱状 (如 2、3、7、8、9、11、13、15 号锆石,晶体长轴为 50~145 μm ,长宽比为 1.2~4.0),部分为浑圆状 (如 11 号锆石),为岩浆结晶过程中形成的锆石;②区域上,存在大致同期幔源岩浆活动形成的基性岩石和后造山伸展作用背景形成的花岗岩,如小盆地 396.5 ± 3.1 Ma 的基性岩墙群^[11]、夏日哈木 439.1 ± 3 Ma 的辉长岩^[33]、冰沟南 427.4 ± 7.3 Ma 的辉长岩^[46]、乌兰乌珠尔 417 ± 3 Ma 的花岗斑岩、卡尔却卡 B 区 406.4 ± 4.2 Ma 的黑云母二长花岗岩、拉陵灶火 396.2 ± 2 Ma 的二长花岗岩、鸭子沟 415.5 ± 2.5 Ma 的黑云石英二长闪长岩^[8-10];③辉长辉绿岩侵位的祁漫塔格群火山碎屑岩形成时代为 450~440 Ma^[47],早于 415 ± 16 Ma,排除第一组锆石来源于该地层火山碎屑岩捕获晶的可能。 243 ± 11 Ma 的锆石 U-Pb 年龄应为晚期地幔岩浆上升侵入到早期辉长辉绿岩中形成的锆石结晶年龄,该年龄可能是对中三叠世末期伸展活动的响应,证据如下:①在锆石 CL 图像 (图 5) 上,第二组锆石也均具有清晰规则的韵律环带结构,晶形发育良好,具有清晰的生长环带,多数呈长柱状、柱状 (晶体长轴为 70~145 μm ,长宽比为 1.2~5.0),为岩浆结晶过程中形成的锆石;②微量元素地球化学特征显示,小圆山辉长辉绿岩形成于拉张型岛弧背景,而印支期形成的辉绿岩微量元素地球化学特征显示为板内环境;③野外可见闪长岩脉侵位到早

期形成的辉长辉绿岩脉中,位于小圆山南部约 10 km 处的夏日哈木存在 243 ± 1 Ma 的石英闪长岩^[48],区内侵位的闪长岩脉应为该期形成,辉长辉绿岩中的该组锆石应为受该期闪长岩改造的锆石;④祁漫塔格地区 228~220 Ma 的 A 型富钾高分异花岗岩揭示,中晚三叠世已由陆内造山转变为碰撞后伸展体制^[49],东昆仑小尖山地区发育印支晚期伸展体制下幔源岩浆活动形成的 227.8 ± 0.9 Ma 的辉长岩^[50]。

综上所述,小圆山辉长辉绿岩 415 ± 16 Ma、 243 ± 11 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,应代表晚期深部岩浆上升侵位到辉长辉绿岩中形成的锆石结晶年龄,是对中三叠世末期伸展活动的响应。

7 结 论

(1)东昆仑祁漫塔格小圆山辉长辉绿岩侵位于奥陶系祁漫塔格群碎屑岩组中,属于拉斑玄武岩系列岩石,具有稀土元素含量低,轻、重稀土元素分异不明显,呈轻微正 Eu 异常、负 Ce 异常,轻稀土元素弱富集的特征。岩石明显富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、K、Sr,活泼的不相容元素 U 和 Th,轻稀土元素及 Pb;相对亏损高场强元素 Nb、Ta 和 P。

(2)采用 SIMS 锆石 U-Pb 定年方法,获得小圆山辉长辉绿岩 415 ± 16 Ma (MSWD=5.0) 和 243 ± 11 Ma (MSWD=4.1) 年龄加权平均值,前者代表辉长辉绿岩结晶年龄,为早泥盆世;后者应代表晚期深部岩浆上升侵位到辉长辉绿岩中形成的锆石结晶年龄,是对中三叠世末期伸展活动的响应。

(3)小圆山辉长辉绿岩是拉张型岛弧背景下亏损的岩石圈地幔平衡部分熔融的产物,受到一定程度地壳物质的混染。

致谢:野外工作期间,中国地质调查局西安地质调查中心王洪亮研究员,河南省地质调查院崔霄峰高级工程师给予了悉心指导,项目团队其他成员在野外工作中提供了支持和帮助,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 刘建楠,丰成友,肖克炎,等.东昆仑成矿带成矿特征与资源潜力分析[J].地质学报,2016,90(7): 1364-1376.
- [2] 裴先治,胡楠,刘成军,等.东昆仑南缘哥日卓托地区马尔争组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析[J].地质论评,2015,61(2): 307-323.
- [3] 丰成友,赵一鸣,李大新,等.东昆仑祁漫塔格山地区夏日哈木镍矿

- 床矿物学特征[J].地质论评,2016,62(1): 215-228.
- [4] 陈海福,何书跃,张爱奎,等.东昆仑卡尔斯地区中志留世 A 型花岗岩岩石成因及构造环境[J].地质通报,2021,40(8): 1380-1393.
- [5] 王盘喜,郭峰,王振宁.东昆仑祁漫塔格乌兰拜兴地区中泥盆世花岗岩年龄、地球化学特征及其地质意义[J].地质通报,2020,39(2/3): 194-205.
- [6] 张新远,李五福,欧阳光文,等.东昆仑东段青海红山地区早三叠世火山岩的发现及其地质意义[J].地质通报,2020,39(5): 631-641.
- [7] 赵一鸣,丰成友,李大新,等.青海西部祁漫塔格地区主要砂卡岩铁多金属矿床成矿地质背景和矿化蚀变特征[J].矿床地质,2013,32(1): 1-19.
- [8] 陈静,谢智勇,李彬,等.东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义[J].矿物岩石,2013,33(6): 26-33.
- [9] 郭通珍,刘荣,陈发彬,等.青海乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].地质通报,2011,30(8): 1203-1211.
- [10] 姚磊,吕志成,赵财胜,等.青海祁漫塔格地区牛苦头矿床和卡而却卡矿床 B 区花岗质岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄-对泥盆纪成岩成矿作用的指示[J].地质通报,2016,35(7): 1158-1168.
- [11] 祁生胜,邓晋福,叶占福,等.青海祁漫塔格地区晚泥盆世辉绿岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地质通报,2013,32(9): 1385-1393.
- [12] 罗照华,柯珊,曹永清,等.东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J].地质通报,2002,21(6): 292-297.
- [13] 国显正,贾群子,钱兵,等.东昆仑高压变质带榴辉岩和榴闪岩地球化学特征及形成动力学背景[J].地球科学与环境学报,2017,39(6): 735-750.
- [14] 潘彤.青海矿床成矿系列探讨[J].地球科学与环境学报,2019,41(3): 297-315.
- [15] Li X H, Tang G Q, Gong B, et al. Qinghai zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(36): 4647-4654.
- [16] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20, 325-343.
- [17] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//Thorpe R S, Andesites. Chichester: Wiley, 1982: 525-548.
- [18] Jakes P, White A J R. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas[J]. Geological Society of America Bulletin, 1972, 83(1): 29-40.
- [19] Wilson M. Igneous petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-466.
- [20] Melon W G, Vallier T L, Wright T L, et al. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic, and Indian Ocean Sea-Floor Spreading Centers [C]//Sutton G H, Manghni M H, Moberly R, et al. The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin. Washington, DC: American Geophysical Union, 1976: 351-367.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and process [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the ocean basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [22] 吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16): 1589-1604.
- [23] Wendlandt R F, Altherr R, Nuemann E R, et al. Petrology, geochemistry isotopes [C]//Olsen K H. Continental Rifts: Evolution, Structures, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 1995: 47-60.
- [24] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. Journal of Petrology, 1978, 19: 463-513.
- [25] Thompson R N, Morrison M A. Asthenospheric and lower lithospheric mantle contributions to continental extensional magmatism: An example from the British Tertiary province[J]. Chemical Geology, 1988, 68: 1-15.
- [26] 李印,韩峰,凌明星,等.蚌埠荆山和涂山岩体的年代学、地球化学特征及其动力学意义[J].大地构造与成矿学,2010,34(1): 114-124.
- [27] 陈进全,徐兆文,白亢辰,等.内蒙古哈达特陶勒盖铅锌矿区辉绿岩岩石化学研究[J].大地构造与成矿学,2012,36(1): 118-126.
- [28] 袁兆亮,成秋明,左仁广.辉绿岩风化过程中的元素迁移研究[J].矿物学报,2013,34(s2): 1026.
- [29] 赵晓燕,杨竹森,侯增谦,等.西藏邦铺矿区辉绿岩成因及对区域构造岩浆演化的指示[J].岩石学报,2013,29(11): 3767-3778.
- [30] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997.
- [31] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2): 381-397.
- [32] Hart S R, Hauti E H, Oschmann L A, et al. Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence[J]. Science, 1992, 256(5056): 517-520.
- [33] 姜常义,凌锦兰,周伟,等.东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景[J].岩石学报,2011,31(4): 1117-1136.
- [34] Myers R E, Breitkopf J H. Basalt geochemistry and tectonic settings: A new approach to relate tectonic and magmatic processes [J]. Lithos, 1989, 23(1/2): 53-62.
- [35] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11-30.
- [36] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [C]//Hawkesworth C J, Norry M J. Continental basalts and mantle xenoliths. Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, 1982: 158-185.
- [37] Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 14991-15019.
- [38] 欧阳京,汪双双,于漫,等.岛弧环境中不同成因的火成岩组合及其地质意义[J].甘肃地质,2010,19(2): 18-24.
- [39] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andsities across the Archaean-proterozoic boundary: identification and significance [J].

- Lithos, 1989, 23: 1-18.
- [40] Lentz D R. Petrogenetic evolution of felsic volcanic sequences associated with Phanerozoic volcanic - hosted massive sulphide systems: the role of extensional geodynamics [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 12: 289-327.
- [41] Tamimount A, Dominique W, Andre G, et al. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tanncherfi intrusive complex, northeastern Morocco: geochemical, isotopic and geochronological evidence[J]. Lithos, 1998, 45: 371-393.
- [42] Meschede M A. Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental theleiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56: 207-218.
- [43] 王盘喜, 杨霄, 卞孝东. 冀中坳陷火成岩岩石学及地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 1-10.
- [44] 刘栋梁, 李海兵, 孙知明, 等. 青藏高原祁漫塔格古生代以来主要岩浆活动及其意义[J], 地质通报, 2016, 35(12): 2014-2026.
- [45] 田广阔, 孟繁聪, 范亚洲, 等. 东昆仑早古生代造山后花岗岩的特征——以大干沟花岗岩为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, (3): 371-390.
- [46] 何书跃, 孙非非, 李云平, 等. 青海祁漫塔格地区冰沟南辉长岩岩石地球化学特征及年代学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(4): 582-592.
- [47] 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 滩间山群的重新厘定——来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1452-1463.
- [48] 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(3): 876-891.
- [49] 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665-678.
- [50] 奥琮, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑祁漫塔格地区小尖山辉长岩地球化学特征、U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 1176-1184.
- ①孙丰月, 李碧乐, 丁清峰, 等. 东昆仑成矿带重大找矿疑难问题研究. 中国地质调查局地质调查项目成果报告, 2009.